



# 邢钢 80 t LF 钢包精炼炉的工程设计

武国平 秦友照

(北京首钢国际工程技术有限公司炼钢设计室, 北京 100043)

**摘要** 介绍了邢钢 80 t LF 钢包精炼炉的工艺流程, 计算并确定主要设备及电气参数选型, 并根据计算的电气及热工参数绘制出“电气特性曲线”。

**关键词** LF 设计 短网 导电横臂 水冷炉盖 电气特性

## Engineering Design of Xingtai Steel's 80 t LF Ladle Refining Furnace

Wu Guoping Qin Youzhao

(BSIET Steelmaking Technology Section, Beijing 100043)

**Abstract** This paper introduces the process diagram of Xingtai Steel's 80t LF refining furnace. Main devices and electrical parameters are calculated, and the electric characteristic graph is drew according to the calculated electric and thermal parameters.

**Key words** LF; design; short net; current conducting arm; water-cooled furnace roof; electric characteristic

### 1 前言

邢台钢铁有限责任公司为提高现有产品质量, 提升产品档次, 优化拓宽产品结构, 2007 年开始建设精品钢生产线工程, 精品钢生产线炼钢系统由首钢国际工程公司设计, 包括 1 座 80 t 转炉改造、1 座 80 t LF 钢包精炼炉、1 座 80 t RH 真空脱气精炼炉、1 台四机四流 280 × 325 mm 大方坯连铸机及相应的公辅设施等, 该生产线用于生产高级冷镦钢、帘线钢、高级弹簧钢及轴承钢、齿轮钢等。该生产线于 2007 年 8 月 18 日顺利竣工并投入运行。

由于转炉车间和精品钢车间分属两个独立的厂房车间, 钢水包需进行倒运, 运输距离 70 m, 温降较大, 因此 LF 钢包精炼炉充分发挥了转炉和连铸之间的缓冲器作用, 能够承上启下, 协调生产节奏。另外 LF 钢包精炼炉为大方坯连铸机提供高质量的钢水发挥了重要作用。以下重点介

绍 80 t LF 钢包精炼炉在设计过程中所进行的理论计算及主要参数的确定。

### 2 主要工艺参数

#### 2.1 LF 炉主要工艺参数及技术指标

钢包容量	80 t
熔池直径	Φ2 646 mm
钢包净空	550 mm
变压器容量	15 MVA
一次电压	6 kV
二次电压	320 - 176 V 有载调压 13 级
二次电流	30 490 A
电极直径	Φ400 mm
电极分布圆直径	Φ700 mm
电极升降最大行程	2 800 mm
电极升降速度	5/3.5 m/min 变频调速
升温速度	≥4.0 °C/min
液压系统工作压力	12 MPa
短网三相不平衡系数	≤5%
精炼周期	38 min

武国平 高级工程师; 1970 年生; 现从事炼钢设计;

Email wgp220@sina.com; 收稿/2008-12-30



主要经济指标:

电耗 <40 kWh/t 钢

电极消耗 0.4 kg/t 钢

## 2.2 工艺流程

精品钢生产线工艺流程形式为“转炉→LF RH→CCM”。精品钢生产线的生产钢种均经过 LF 炉和 RH 精炼处理。LF 炉精炼工艺流程及各工位的冶金功能如图 1 所示。

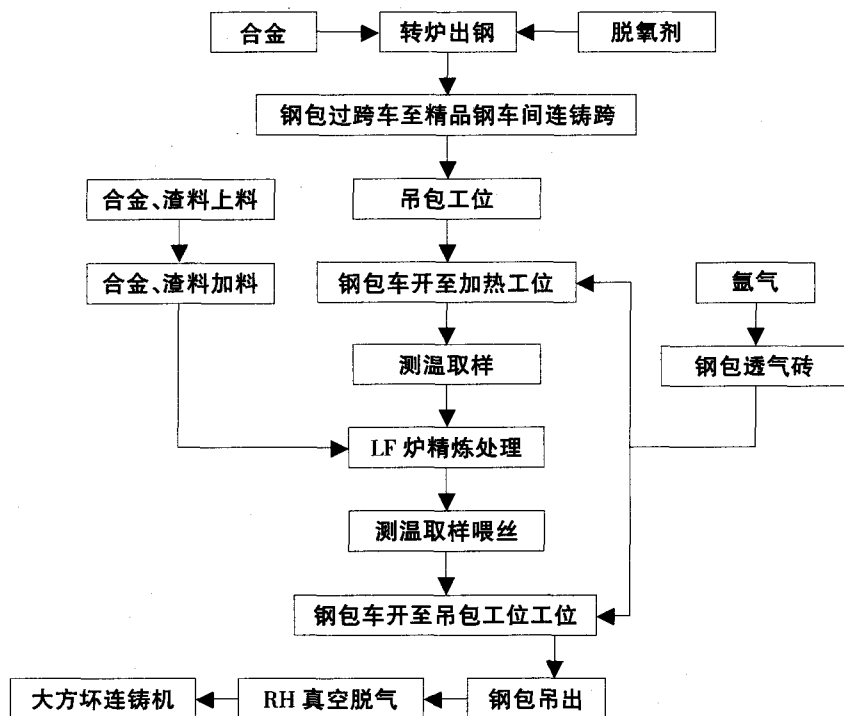


图 1 LF 炉精炼工艺流程

## 3 主要设备设计计算及主要技术参数的确定

### 3.1 变压器容量的确定

LF 炉变压器容量  $P$  与处理的钢水量、钢水的升温速度、功率因数及热效率有关, 可按下列公式确定:

$$P = \frac{G \times \Delta t \times 60 \times 1000 \times K}{860 \times \cos \varphi \times \eta}, \text{ kVA}$$

式中:  $G$ ——钢水重量, t

$\Delta t$ ——钢水升温速度,  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$

$K$ ——钢水比热容, kcal/kg.  $^{\circ}\text{C}$

$\cos \varphi$ ——功率因数

$\eta$ ——钢包加热效率

取  $G = 80 \text{ t}$ ,  $\Delta t = 4 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,  $K = 0.23 \text{ kcal/kg. }^{\circ}\text{C}$ ,  $\cos \varphi = 0.8$ ,  $\eta = 0.48$ , 根据上述公式计算  $P = 13.4 \text{ MVA}$ , 由于本工程的特殊性, 钢包需从炼钢车间运输至精炼车间, 运输距离较远, 为保证生产节奏, 提高加热速度, 变压器额定容量取  $P = 15 \text{ MVA}$ 。

### 3.2 二次电压及电流的确定

钢包炉的二次电压及二次电流的确定是钢

包炉设计过程中的一个重要环节, 对 LF 炉的成功运行相当重要, 二次电压及电流的设计需要综合考虑钢包包衬的寿命、升温速度和工艺。

由美国联合碳化物公司 W. E. Schwabe 提出的耐火材料侵蚀指数用于描述由于电弧辐射引起炉壁耐火材料损坏的程度, 并以耐火材料侵蚀指数的大小来反映耐火材料损坏的外部条件, 表达式如下:

$$R_E = P_{\text{arc}} \cdot U_{\text{arc}} / d^2 = I \cdot U_{\text{arc}}^2 / d^2, \text{ MW} \cdot \text{V}/\text{m}^2$$

式中:  $P_{\text{arc}}$  为单相电弧功率, MW;  $U_{\text{arc}}$  为电弧电压, V;  $d$  为电极侧部至炉壁内衬最短距离, m。

当电弧暴露后,  $R_E$  应限制在  $500 \text{ MW} \cdot \text{V}/\text{m}^2$  以内。但若采用泡沫渣埋弧加热技术, 耐火材料侵蚀指数大于  $500 \text{ MW} \cdot \text{V}/\text{m}^2$  并不表明真正意义上的炉壁烧损程度。计算耐火材料侵蚀指数的意义主要在于当不采用埋弧加热时, 电弧对炉衬的影响。

将整个 LF 工艺过程分成升温期与保温期, 除必须要求采用设备最大加热速率外, 二次电压均应该有选择地确定, 确定的原则:

1) 为减少电弧对包衬的热侵蚀, 降低耐火材



料侵蚀指数,电弧应尽量短、电压低些好。在保温期采用低电压;

2) LF 精炼过程钢液极易增碳,为了防止增碳,电弧电压应高于 70 V 为好;

3) 为提高热效率,采用泡沫渣精炼工艺,从而实现长弧供电,即高电压、低电流。在升温期采用高电压。

综上,电压大小的确定,应考虑耐材侵蚀指数,更主要的是炉渣厚度的大小,一般以渣厚度大于电弧长度为佳;精炼前期(升温期)炉渣发泡性好,电压选大一些,精炼后期(保温期),电压选小一些。

邢钢 80 t 钢包精炼炉在冶炼工艺上采用了泡沫渣技术。因此将二次电压档定为 13 级:最高电压 320 V,最低电压 176 V,采用有载调压方式。在每一档电压下,绘制了电气特性曲线(本文的最后一节),根据电气特性曲线可确定合理的供电制度。

对于二次电流的选择,应以“经济电流”为最佳。在经济电流附近,电弧功率与电损功率随电流的变化率相等,当电流小于经济电流时,电弧功率小,熔化得慢,当电流大于经济电流时,电弧功率增加缓慢,电损功率增加较多,在经济电流附近的  $\cos\Phi$ 、 $\eta$  也比较理想。

### 3.3 短网设计

短网是指从电炉变压器低压侧出线到石墨电极末端为止的二次导体,它主要包括石墨电极、导电横臂、挠性电缆及硬母线。由于这段导线流过的电流特别大,又称大电流导体(或称大电流线路),而长度与输电电网相比又特别短,故常称为短网<sup>[1]</sup>。

短网中通过的大电流,不可避免会引起有功和无功损耗,短网阻抗的大小影响电效率、功率因数及 LF 炉热效率,因而会影响输入功率的大小及电耗的高低;三相短网的布线方式影响三相电弧功率的平衡、炉衬寿命及冶炼周期,从而影响电炉的生产率及炼钢成本。

综上,LF 炉短网设计的重点是降低短网电阻以及平衡三相电抗。

短网中电阻由三部分组成,即直流电阻  $R_0$ 、接触电阻  $R_j$  和附加损耗电阻  $R_t$ ,即:

$$R = K_j \cdot K_e \cdot R_0 + R_j + R_t$$

式中:  $K_j$ 、 $K_e$  分别为考虑集肤效应和邻近效应时的系数。其中:

$$R_0 = \rho_{20} \cdot L / S [\alpha(t - 20)]$$

式中:  $\rho_{20}$  为铜在 20 ℃ 时的电阻率,取

$0.0075 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ;  $L$  为导体长度, mm;  $S$  为导体截面积,  $\text{mm}^2$ ;  $\alpha$  为铜的电阻温度系数,取  $0.0043/^\circ\text{C}$ ;  $t$  为导体的工作温度,  $^\circ\text{C}$ 。

$$R_j = \varepsilon / p^m$$

式中:  $\varepsilon$  为接触材料和接触面有关的系数,铜-铜为  $0.1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{kg}$ ;  $m$  为与接触形式有关的系数,面接触为 1.0,线接触为 0.7;  $p$  为接触对压力,铜母线搭接取 10 MPa。

附加电阻是由于短网附近铁磁构件中因大电流磁场引起的有功损耗,约为短网总电阻的 15% - 25%。

对于等边三角形布置的三相短网,其电抗可用下式计算:

$$X = 0.0628 L \cdot \ln(D/g)$$

式中:  $L$  为导体长度, m;  $D$  为导体互几何均距;  $g$  为导体截面自几何均距。

在整个短网中,电抗值要比电阻值大得多,它是决定三相阻抗平衡的主要参数,而总的电抗值中,挠性电缆和导电铜管约占 75% - 80%,所以优化这一部分的结构,缩短其长度,是一个重要环节。

在设计邢钢 80 t 钢包精炼炉时,为降低短网电阻及电抗值采取了如下措施:

1) 变压器:变压器的二次出线三角型封口在变压器内实施,有利于简化短网布线,进一步降低短网电阻。变压器二次出线采取侧出线,从而降低短网长度。

2) 水冷电缆与石墨电极:在保证水冷电缆曲率半径的要求情况下,缩短水冷电缆的长度,以减少水冷电缆电阻。为减少石墨电极的电阻,LF 炉运行时尽量使电极夹头下的电极尽量短。第二个降低水冷电缆与石墨电极电阻的措施是增大导体截面积。

水冷电缆的截面与石墨电极直径计算公式如下:

$$S = I_{\max} / J = 0.27 I_n, \text{mm}^2/\text{相}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot I_{\max}}{\pi \cdot J}}, \text{cm}/\text{相}$$

式中:  $I_n$  为二次额定电流, A;  $I_{\max}$  为最大工作电流, A;  $J$  为导体的电流密度,  $\text{A}/\text{mm}^2$ 。

根据计算及对国产超高功率石墨电极进行考察( $\Phi 400$  mm 电极允许的电流密度为  $31 \text{ A}/\text{cm}^2$ ),邢钢 80 t 钢包精炼炉电极直径采用  $\Phi 400$  mm。

经过系统计算,短网的阻抗值为  $0.6 + j2.0 \text{ m}\Omega$ 。



### 3.4 导电横臂

传统横臂是由钢制电极横臂、电极夹头及夹紧机构、固定在横臂上方的水冷导电铜管等组成。钢制电极横臂起悬臂支撑电极并带动电极上下移动的作用,本身要承受较大的加速度。电流顺着导电铜管、电极夹头流过石墨电极,输入炉内。因为此结构的绝缘处在高温区,工作环境恶劣;导电铜管中流过大电流,在强磁场作用下会产生较大的电动力。所以,传统横臂故障多,维修工作量大<sup>[2]</sup>。

本工程将传统的导电铜管去掉,采用铜钢复合板导电横臂技术。导电横臂结构使横臂既为支撑体,同时又作为导体,简化了结构;另外增加了横臂体的刚度,在横臂体内通水冷却,提高了横臂的使用寿命,且减少了维修工作量。因其绝缘件避开了高温区,也提高了可靠性。采用铜钢复合板制作的导电横臂与导电铜管比较,首先其长度比导电铜管要短约 10%,截面积比导电铜管大,导电横臂的直流电阻要比铜管明显减小;其次,导电横臂的自几何均距要比导电铜管的自几何均距大得多,其等效电抗值比导电铜管显著减小,这样就提高了炉子的电效率,可以增加输入炉内的功率,缩短熔炼时间,提高生产率。

导电横臂的结构如图 2 所示。

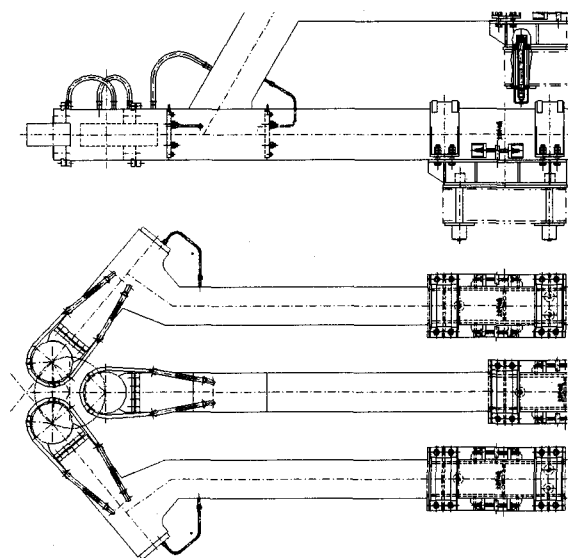


图 2 三相导电横臂布置及结构

从图 2 可以看出,导电横臂采用三臂式结构,在空间为三角形布置,为悬臂形式。为减小阻抗及三相不平衡,中相导电横臂前端部分与边相

导电横臂处于同一平面,后端高出边相导电横臂。边相导电横臂前端采用倒“八形”,减小了电极分布圆直径,从而也减少了电弧对包衬的辐射。横臂与立柱之间采用通长的螺杆联接,导电横臂体开有上下贯通的长孔,安装方便。而且保证了足够的联接强度,立柱顶部的联接座也采用水冷。

导电横臂外型是矩形梁结构,用铜钢复合板焊制成箱体,所选用的铜钢复合板为 T2 板和 A3 钢板爆炸成型,既保证了连接强度,也保证了基材钢板的刚度。整体焊接时,在钢与钢焊好后再将铜与铜焊接,所有焊缝要求非常严格。

导电横臂通水冷却。为了保证密封性、长期使用的可靠性,横臂内用无缝钢管做芯管,在导电横臂内的油管均为整根不锈钢无缝管,没有接管。在三相导电横臂的前端矩形截面内,各安装有电极放松缸。通过电极夹头、电极抱闸采用蝶形弹簧恢复力抱紧电极,液压油缸压缩碟形弹簧推开电极抱闸放松电极,电极加紧力为 196 kN。电极放松缸具有互换性,是特殊设计的专用油缸,内装有蝶形弹簧。为了便于检修、更换活塞密封圈,活塞与活塞杆是分开的,在夹持电极的状态下即可方便的更换密封圈。

电极夹头是用螺栓固定在导电横臂上。电极夹头采用铬青铜经锻造加工而成形。

电极抱闸采用水冷夹层的非导磁奥氏体不锈钢制作,防止因强磁形成通路使之发热。抱闸上焊有不锈钢条,经机械加工成圆弧面,夹紧时抱住电极。为了有较高的使用寿命,其圆弧面上喷涂有耐高温的陶瓷绝缘材料。电极抱闸与电极放松缸活塞杆相连。

钢板厚度主要考虑其结构强度问题,设计中我们选择 15 mm 厚的钢板。而铜板厚度的选择要考虑“集肤”深度、载流能力及铜钢复合工艺。

集肤效应是由导体的自感引起的。通过导体的交流电流在导体表面处密度最大,而在导体中心处最小。在距离导体表面某一点,该点的电流密度为表面的  $1/e$  ( $e=2.7183$ ) 时,此距离称为“集肤”穿透深度,用  $\delta$  表示。

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu}}$$

式中:  $f$  为频率;  $\mu$  为导体材料的相对磁导率;  $\rho$  为导体材料的电阻率,  $\Omega \cdot \text{cm}$ 。

铜质导体材料的电阻率为  $1.75 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ,磁导率近似取 1。按上述公式计算的铜质导体的穿透深度为 9.4 mm。

### 3.5 水冷炉盖的设计

水冷炉盖为管式密排结构,由炉盖本体及排烟集尘罩等组成。炉盖本体用无缝钢管弯制焊接而成,炉盖上开有与三相电极相对应的电极孔。

炉盖的集烟由两部分组成,一部分为中心集烟筒,一部分为裙边集烟罩,中心集烟筒用于收集由电极孔冒出的烟尘,裙边集烟罩用于收集由钢包与炉盖之间冒出的烟尘,两处集烟管路汇集成一根总管,接到除尘系统。在炉盖本体上除了三个电极孔外,还设有合金加料孔、测温取样孔、喂丝孔,各孔均有相应的密封阀盖,根据需要可打开或关闭相应孔盖,孔盖的启、闭靠气缸驱动来完成。

水冷炉盖设计的关键问题是计算炉盖上水冷管的水流量。水流量确定的合理与否,将直接影响到炉盖的使用寿命和炉内的热效率。

炉盖用水量的大小决定于电弧对炉盖上通水冷却的水冷管的辐射强度,即炉盖上最大热负荷量,可根据热辐射理论的计算公式求得。经计算炉盖的热负荷值为  $Q = 103 \text{ kW/m}^2$ 。

水流量  $Q_v$  按下式计算:

$$Q_v = 3.6 \cdot Q \cdot S / (c \cdot \Delta t), \text{ m}^3/\text{h}$$

式中:  $\Delta t$  为水的温升  $15^\circ\text{C}$ ;  $S$  为炉盖水冷区的面积,经计算  $S = 29 \text{ m}^2$ ;  $c$  为水的比热容  $4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

经计算  $Q_v = 170 \text{ m}^3/\text{h}$

电弧对炉盖的辐射强度大小,在不同位置有

较大的差异(主要是辐射的角度和距离的原因),所以在流量分配上也要有所侧重。炉盖下沿辐射强度最大,故此处水流量分配大些;相反,炉盖上面辐射强度小些,水分配量少些。经计算及结构上设计,本工程水冷炉盖上共设有 8 路水。

### 3.6 电气特性曲线

为计算方便,将 LF 炉供电线路折算成三相交流等效电路图,如图 3 所示,在三相对称的情况下得到单线等效电路图,其中电弧电阻  $R_{\text{arc}}$  是可变的。电网根据电学及传热学原理可推导出有关电流量表达式,见表 1。

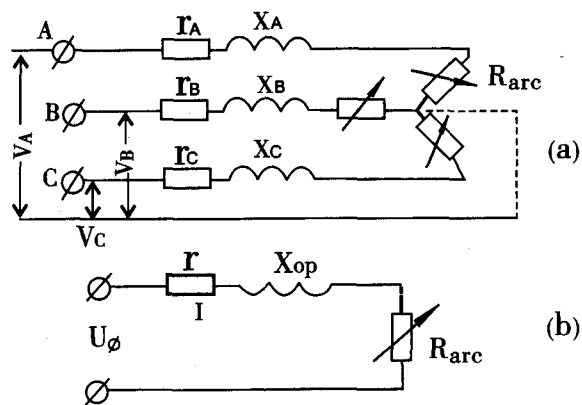


图 3 三相交流 LF 炉等效电路图

(a) 三相等效电路图

(b) 单线等效电路图

$r_A, r_B, r_C, r$ ——相电阻;

$X_A, X_B, X_C, X_{op}$ ——相电抗

$V_A, V_B, V_C, U_\phi$ ——相电压;  $R_{\text{arc}}$ ——电弧电阻

表 1 电气量值及热工量值关系式

相电压/V	$U_\phi = U / \sqrt{3}$
二次电压/V	$U$
总阻抗/ $\text{m}\Omega$	$Z = \sqrt{(r + R_{\text{arc}})^2 + x^2}$
电弧电流/kA	$I = U_\phi / Z$
视在功率(三相)/kVA	$S = \sqrt{3} IU = 3I^2 Z$
无功功率(三相)/kvar	$Q = 3I^2 x$
有功功率(三相)/kW	$p = \sqrt{S^2 - Q^2} = 3I \sqrt{U_\phi^2 - (Ix)^2}$
电损功率(三相)/kW	$P_r = 3I^2 r = p - P_{\text{arc}}$
电弧功率(三相)/kW	$P_{\text{arc}} = 3I^2 R_{\text{arc}} = 3IU_{\text{arc}} = 3I(\sqrt{U_\phi^2 - (Ix)^2} - Ir)$
电弧电压/V	$U_{\text{arc}} = P_{\text{arc}} / 3I$
效率(%)	$\eta_E = P_{\text{arc}} / P$
功率因数	$\cos\phi = P / S$
电弧长度/mm	$L_{\text{arc}} = U_{\text{arc}} - 40$
耐材磨损指数/ $\text{MW} \cdot \text{V} \cdot \text{m}^{-2}$	$R_E = \frac{U_{\text{arc}}^2 I}{d^2}$
钢水升温速率/ $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$	$v = \frac{3U_\phi \cdot I \cdot \cos\phi \cdot \eta_E \cdot \eta_H}{60c \cdot G} = \frac{P_{\text{arc}} \cdot \eta_H}{60c \cdot G}$



根据表中公式,可以绘出各档电压下的电气特性曲线。图 4 给出了邢钢 80 t LF 炉在第 13 档电压 320 V 下的电气特性曲线,其中的横坐标为电流,纵坐标为各电气量值。

通过对电热特性曲线的分析,我们可从以下几方面指导供电制度:

#### 1) 加热速率与炉子热效率

一般加热速率与电弧功率、炉子热效率成正比。在每级电压下均有一点电流能使加热速率为最大,且加热速率随二次电压的升高而加大。

#### 2) 电弧功率与电损功率

在每级电压下电弧功率均有最大值,在电弧功率最大值的右边,当电流增加、电弧功率降低。

电损功率与电流的平方成正比,尤其当电流接近电弧功率最大值或超过时,电损功率随电流的变化率增加,功率因数、电效率降低。

#### 3) 经济电流<sup>[4]</sup>

当电流较小时电弧功率随电流增长较快,而电损功率随电流增长缓慢;当电流增加到较大区域内时,情况恰好相反。这说明在特性曲线上有一点(电流)能使电弧功率与电损功率随电流的变化率相等,此点对应的电流叫“经济电流”。当电流小于经济电流时,电弧功率小,熔化得慢,当电流大于经济电流时,电弧功率增加不多,电损功率增加不少,在经济电流附近的  $\cos\Phi$ 、 $\eta$  也比较理想。

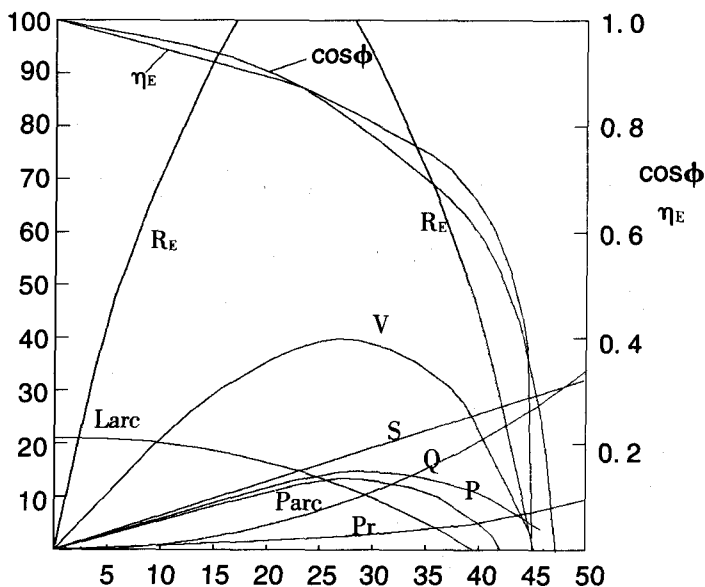


图 4 80 t LF 炉 320V 电压下的电热特性曲线

视在功率 $S/\text{MVA}$	电弧电压 $U_{\text{arc}}/\times 10\text{V}$
无功功率 $Q/\text{Mvar}$	无功功率 $L_{\text{arc}}/\times 10\text{mm}$
电弧功率 $P_{\text{arc}}/\text{MW}$	电弧功率 $R_{\text{e}}/\text{kW} \cdot \text{V} \cdot \text{cm}^{-2}$
有功功率 $P/\text{MW}$	有功功率 $v/\times 0.1 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-2}$
功率损失 $P_{\text{r}}/\text{MW}$	

## 4 结 语

在邢钢 80 t LF 钢包精炼炉的设计过程中,对设备主要参数进行了充分的理论计算,尤其对其电气及热工特性进行了分析,并绘制了电热特性曲线,对 LF 炉供电制度的制定有着重要的指导作用。经过一年的运行考验,邢钢 80 t LF 钢包精炼炉运行平稳,处理的钢种全部为品种钢,包括冷镢钢、琴钢丝用钢、工具钢、齿轮钢、弹簧钢、轴承钢等,钢水质量满足邢钢精品钢生产线的产品要求,各技术指标均达到了设计要求。

## 参考文献

- [1] 朱苗勇,杜钢. 现代冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社,2005.
- [2] 张大方. 导电横臂的开发应用[J]. 工业加热, 1994, (5):22.
- [3] 李士琦,等. 现代电弧炉炼钢[M]. 北京:原子能出版社,1995.
- [4] 阎立懿,等. LF 炉电热特性及供电制度[J]. 工业加热,1994;(5):22.